УДК:621.592.3
DOI: 10.53015/18159958_2025_21_4_3

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ ЧАСТИЧНОГО СЖИЖЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛООБМЕННИКА-ВЫМОРАЖИВАТЕЛЯ

INCREASING THE EFFICIENCY OF A PARTIAL LIQUEFACTION PLANT FOR NATURAL GAS USING A HEAT EXCHANGER-FREEZER

©2025
Картель Илья Юрьевич[1], аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики
Картель Александр Юрьевич[2], кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики
Губарев Василий Яковлевич[3], кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики
Kartel Ilya Yuryevich[1], Postgraduate student of the Department of Industrial Thermal Power Engineering
Kartel Alexander Yuryevich[2], Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Heat Power Engineering
Gubarev Vasily Yakovlevich[3], Candidate of Technical Sciences, Professor, Head of the Industrial Heat Power Engineering

Липецкий государственный технический университет, Липецк (Россия)
Lipetsk State Technical University, Lipetsk (Russia)

E-mail: kartellip@gmail.com [1]ORCID: https://orcid.org/0009-0009-8585-9247
E-mail: kartel_ayu@stu.lipetsk.ru [2]ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5435-0212
E-mail: gv_lipetsk@rambler.ru [3]ORCID: https://orcid.org/0009-0001-6690-3355

Аннотация: В статье рассмотрена установка частичного сжижения природного газа, работающая по циклу Клода, модернизированная за счёт установки теплообменника-вымораживателя перед блоком адсорбционной осушки. Проведено термодинамическое моделирование для чистого метана. Доказано, что установка теплообменника-вымораживателя обеспечивает предварительное охлаждение природного газа с последующей конденсацией водяных паров до стадии адсорбционной осушки. Это позволяет частично удалить влагу, уменьшив тем самым нагрузку на блок осушки, что в свою очередь позволит уменьшить размеры самого блока и сократить количество тепла, необходимого для регенерации сорбента. Результаты исследования подтверждают возможность снижения капитальных и эксплуатационных затрат и повышения общей термодинамической эффективности цикла частичного сжижения природного газа.

Ключевые слова: частичное сжижение природного газа; цикл Клода; теплообменник-вымораживатель; осушка газа; термодинамическое моделирование; рекуперация холода; энергетическая эффективность.

Для цитирования: Картель, И.Ю. Повышение эффективности установки частичного сжижения природного газа при использовании теплообменника-вымораживателя / И.Ю. Картель, А.Ю. Картель, В.Я. Губарев // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2025. – Т. 21, № 4 (80). – С. 3–13. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_3.

Abstract: The paper examines a partial natural gas liquefaction unit operating on the Claude cycle and modified by introducing a pre-drying freeze-out heat exchanger installed upstream of the adsorption dehydration block. Thermodynamic modeling was performed for pure methane. It is demonstrated that the incorporation of thefreeze-out heat exchanger ensures preliminary cooling of the natural gas with subsequent condensation of water vapor prior to the adsorption stage. This enables partial moisture removal, thereby reducing the load on the dehydration block, which in turn allows decreasing its size and lowering the heat required for sorbent regeneration. The results confirm the potential for reducing both capital and operating costs and for improving the overall thermodynamic efficiency of the partial liquefaction cycle.

Keywords: partial natural gas liquefaction; Claude cycle; freeze-out heat exchanger; gas dehydration; thermodynamic modeling; cold energy recuperation; energy efficiency.

For citation: Kartel I.Yu. Increasing the efficiency of a partial liquefaction plant for natural gas using a heat exchanger-freezer / I.Yu. Kartel, A.Yu. Kartel, V.Ya. Gubarev // Vesti of Higher Educational Institutions of the Chernozem region. – 2025. – Vol. 21, № 4 (80). – P. 3–13. – DOI 10.53015/18159958_2025_21_4_3.

ВВЕДЕНИЕ

Сжижение природного газа (СПГ) остаётся одним из наиболее эффективных способов транспортировки и хранения углеводородов, особенно в условиях отсутствия развитой трубопроводной инфраструктуры. В мировой практике технологии СПГ активно применяются как для магистральных поставок, так и для локального газоснабжения, включая удалённые районы, промышленные предприятия и объекты транспорта. Развитие малотоннажного и частичного сжижения газа в последние годы получило особое внимание в связи с задачами диверсификации топливных источников и увеличения гибкости энергосистем.

В России формируется собственная научно-техническая база в области технологий сжижения природного газа, ориентированная на создание энергоэффективных и адаптированных к климатическим условиям решений. Активное развитие малотоннажных установок СПГ связано с необходимостью обеспечения удалённых территорий, в частности для освоения Арктики, а также автономных энергетических комплексов. При этом особое значение приобретают технологические схемы, сочетающие высокую эффективность охлаждения и простоту реализации, что позволяет снижать капитальные и эксплуатационные затраты при сохранении надёжности работы оборудования.

Одной из ключевых технологических проблем при подготовке природного газа к сжижению является необходимость удаления влаги и диоксида углерода (CO_2). При температурах ниже −60 °C влага и CO_2 кристаллизуются, что может приводить к образованию кристаллогидрат и последующему засорению трубопроводов, нарушению работы оборудования и аварийным ситуациям. Поэтому осушка газа до точки росы ниже температуры начала сжижения является обязательным этапом всех промышленных схем. На практике применяются различные методы осушки и охлаждения, включая многоступенчатые теплообменные аппараты, адсорбционные колонны и циклы с турбодетандерными агрегатами [1,11–15]. Однако такие системы нередко отличаются высокой стоимостью, значительными габаритами и повышенными требованиями к эксплуатации.

В рамках данной работы рассматривается принципиальная схема установки частичного сжижения природного газа, описанная в патенте [1]. Указанная схема содержит функциональные элементы для осушки, охлаждения и детандерного расширения потока природного газа. В процессе изучения данной схемы и последующего моделирования было выявлено, что для эффективного удаления избытка влаги в блоки осушки необходимы большие капитальные и эксплуатационные затраты. В связи с чем было разработано альтернативное решение, позволяющее снизить затраты и повысить эффективность блока осушки путём установки теплообменника-вымораживателя.

Целью настоящего исследования является сравнение исходной схемы (рис. 1) с предложенной модификацией (рис. 2), включающей дополнительный теплообменник-вымораживатель и перераспределение потоков, обеспечивающее более глубокое охлаждение газа до его поступления в блок осушки. В работе приведены термодинамическое обоснование решения, анализ условий эксплуатации, а также оценка влияния предложенной конфигурации на эффективность подготовки газа к сжижению.

ТЕОРИЯ ВОПРОСА

В качестве исходного объекта исследования рассматривается принципиальная схема установки частичного сжижения природного газа, описанная в патенте [1] и представленная на рис. 1. Данная установка предназначена для поэтапного охлаждения и частичного сжижения природного газа с предварительной осушкой и очисткой от диоксида углерода.

Схема включает блок очистки газа, адсорбционную систему для осушки, теплообменные аппараты для последовательного охлаждения потока, турбодетандерный агрегат и сепарационные ёмкости для выделения жидкой фракции. Работа установки основана на классическом термодинамическом цикле, в котором используется энергия расширения газа для получения холода и снижения температуры потока до условий, близких к сжижению.

Анализ схемы показал, что последовательное охлаждение и осушка газа позволяют обеспечить стабильную работу установки, однако эффективность осушения в значительной степени определяется температурой и влагосодержанием газа на входе в адсорбционный блок. Эти параметры могут варьироваться согласно [2], и тем самым при поступлении газа с температурой выше 0 °C и повышенным влагосодержанием нагрузка на осушающие элементы существенно возрастает. Это требует увеличения массы сорбента, усложнения системы регенерации и, как следствие, роста капитальных и эксплуатационных затрат.

Таким образом, исходная принципиальная схема (рис. 1) обеспечивает частичное сжижение природного газа с заданными технологическими параметрами, однако высокая энергозатратность на стадии осушки даёт возможность для альтернативного решения, позволяющего сократить нагрузку на этот блок путём установки теплообменника-вымораживателя (рис. 2), который обеспечивает предварительное охлаждение поступающего в установку потока газа и частичную конденсацию водяных паров ещё до блока осушки.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ ТЕХНИЧЕКОЕ РЕШЕНИЕ

Для снижения энергозатрат на стадии осушки и повышения её эффективности предложены следующие изменения исходной схемы (рис. 1): установка теплообменника-вымораживателя (15) перед блоком осушки (2) и изменение схемы взаимодействия потоков в теплообменных аппаратах, направленное на сохранение холода возвращаемого потока для последующего использования в теплообменнике-вымораживателе.

В предлагаемой схеме (рис. 2) входной магистральный газ сначала проходит через теплообменник-вымораживатель (15), где за счёт охлаждения возвращаемым потоком обеспечивается частичная конденсация влаги, что позволяет уменьшить влагосодержание газа перед осушкой. Следующее отличие предлагаемой схемы заключается в том, что газ после сжатия в компрессорной части охлаждается в охладителе (7) внешним потоком из магистрали (16), а не за счёт прогрева возвращаемого потока. Благодаря этому возвращаемый поток, прошедший через теплообменные аппараты 9 → 8 → 15, подходит к (15) при более низкой температуре, что обеспечивает требуемый температурный напор для вымораживания влаги в теплообменнике-вымораживателе.

Расчётная оценка показывает, что дополнительное охлаждение поступающего потока газа на 10–15 °C в теплообменнике-вымораживателе приводит к снижению влагосодержания до двух раз, что уменьшает количество сорбента и размеры всего адсорбционного блока. Кроме того, снижается количество тепла, необходимого для реге-

нерации сорбента. Внесённое изменение не меняет принцип работы детандерного контура и не требует введения внешнего хладагента в основной цикл сжижения: внешний поток (16) используется точечно в охладителе (7) для разгрузки возвращаемого потока по теплу. Так же поток (16) может использоваться для собственных нужд, так как после выхода из охладителя (7) его температура может достигать 40–60 °С.

Результаты анализа показали, что использование теплообменника-вымораживателя не приводит к существенному усложнению конструкции установки и может быть реализовано в существующих технологических линиях. Это делает решение практически применимым для промышленных установок малотоннажного и частичного сжижения природного газа, обеспечивая повышение энергоэффективности и снижение эксплуатационных затрат.

ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

Работа установки частичного сжижения природного газа основана на термодинамическом цикле Клода, в котором используется энергия расширения газа в детандере для получения холода и последовательного охлаждения основного потока. В классической конфигурации цикла детандерный поток после расширения направляется на теплообмен, где он охлаждает поступающий природный газ до температур, близких к точке начала сжижения.

В предлагаемом решении ключевым дополнением цикла является установка теплообменника-вымораживателя. Это позволяет реализовать предварительное охлаждение поступающего газа ещё до стадии адсорбционной осушки, используя низкопотенциальный холод возвращаемого потока без увеличения энергозатрат. Таким образом, достигается более полное использование энтальпийного потенциала обратного потока при сохранении энергетического баланса цикла.

Моделирование показало, что при температуре поступающего в установку газа 10 °С и давлении 40 атм, после компрессии до 90 атм и последующего детандерного расширения до 18 атм, температура потока в нижней точке цикла достигает порядка −100 °С. В результате в контуре возвращаемого потока формируется стабильный источник холода, достаточный для эффективного охлаждения входного газа в теплообменнике-вымораживателе.

Эффективность работы теплообменника-вымораживателя определяется температурным перепадом между прямым и обратным потоками: чем ниже температура возвращаемого газа, тем выше степень предварительного охлаждения поступающего потока. Расчёты показывают, что при температуре возвращаемого потока порядка −30 °С обеспечивается необходимый тепловой напор (около 15 °С), достаточный для эффективного охлаждения поступающего природного газа с 10 °С до −15 °С. Такое охлаждение позволяет снизить влагосодержание газа более чем в два раза, что значительно снижает нагрузку на адсорбционный блок и уменьшает энергозатраты на его регенерацию.

С термодинамической точки зрения, введение дополнительного теплообменного звена приводит к увеличению степени рекуперации холода без нарушения энергетического равновесия цикла. Энергетические потери при этом минимальны, поскольку процесс осуществляется в рамках существующего диапазона температуры и давления, характерного для цикла Клода. Расчётные данные показывают согласованность всех термодинамических параметров, что подтверждает устойчивость работы установки в выбранных режимах.

Таким образом, предложенная модификация обеспечивает рациональное использование внутреннего холода установки, улучшает термодинамические параметры подготовки газа и повышает общую эффективность цикла частичного сжижения без необходимости применения внешних холодильных контуров.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 1 представлена исходная схема установки частичного сжижения природного газа согласно [1]. В данной схеме используется традиционный цикл Клода с компрессором, теплообменными устройствами

и турбодетандером, обеспечивающим охлаждение газа до температуры частичного сжижения. В установке реализуется последовательное охлаждение потока, его сжатие и расширение, однако отсутствует предварительная подготовка газа до поступления в блок адсорбционной осушки, что приводит к увеличению энергоёмкости и габаритов осушающего узла.

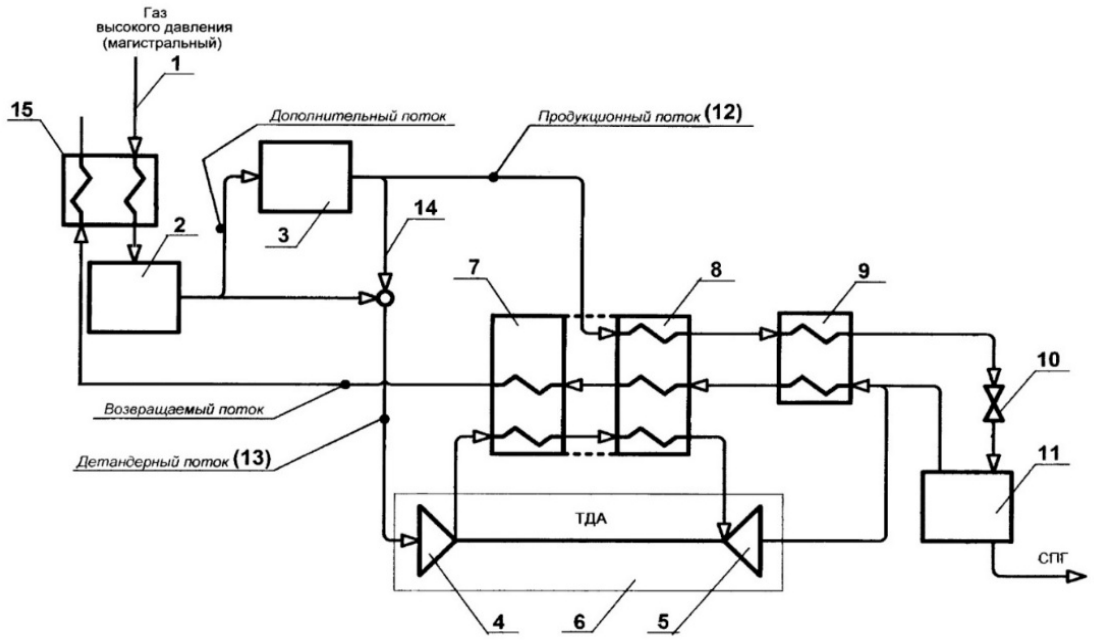


Рис. 1. Исходная принципиальная схема установки
Fig.1. Initial schematic diagram of the installation

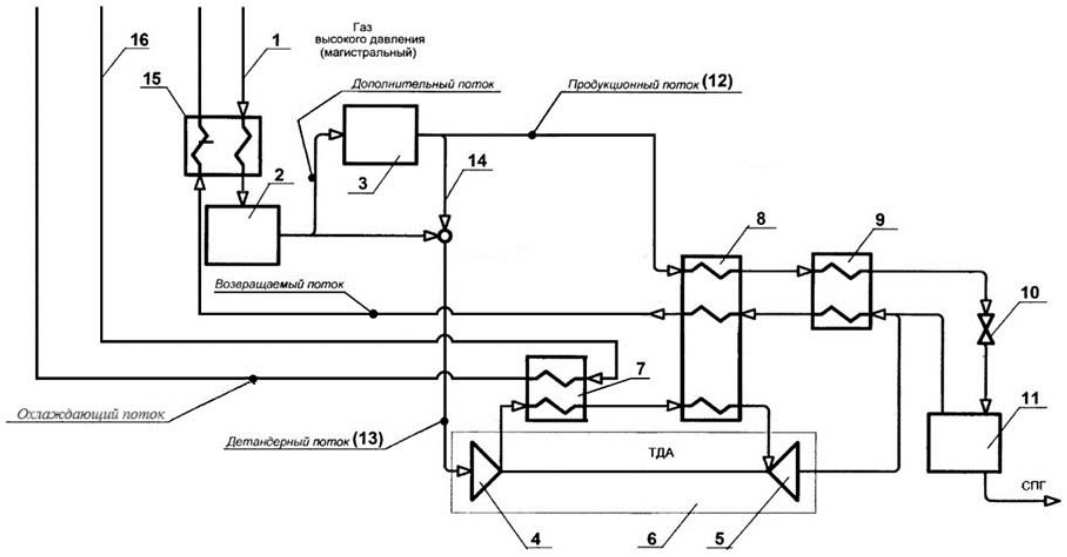


Рис. 2. Предложенная принципиальная схема установки
с теплообменником-вымораживателем
Fig. 2. The proposed schematic diagram of the installation with a heat exchanger-freezer

На рис. 2 представлена предложенная схема, отличающаяся установкой дополнительного теплообменника-вымораживателя в трубопровод подачи газа. Его установка позволяет использовать низкопотенциальный холод возвращаемого потока для предварительного охлаждения поступающего природного газа до стадии адсорбции, что приводит к частичной конденсации водяных паров и уменьшению влагосодержания газа. Тем самым снижается нагрузка на адсорбционный блок и уменьшается потребность в тепле на регенерацию сорбента, сохраняя при этом общую энергетическую целостность цикла. Работа установки моделировалась в координатах h–logP для чистого метана на основе цикла Клода с дополнительными теплообменными звеньями. Процессы в теплообменниках рассматривались как идеальные — без учёта тепловых потерь и гидравлического сопротивления, что позволило оценить внутреннюю энергоэффективность и баланс температурных уровней. Диаграмма приведена на рис. 3.

Последовательность процессов в установке:

1–2 — охлаждение входящего потока газа в теплообменнике-вымораживателе;

2–3 — сжатие в компрессорной ступени турбодетандера;

3–4 — охлаждение после компрессора во внешнем охладителе;

4–5 — охлаждение в предварительном теплообменнике;

5–6 — расширение в детандере (температура −100 °C);

6–7 — нагрев в основном теплообменнике (до −87 °C);

7–8 — нагрев в предварительном теплообменнике (до −30 °C);

8–9 — нагрев в теплообменнике-вымораживателе и возврат на вход установки (до −4 °C).

Продукционный поток составляет 15 % от общего объема газа, поступающего в установку. После детандерного расширения до 18 атм температура потока снижается до −100 °C, что создаёт достаточный холодильный потенциал для всего теплообменного процесса. На входе в теплообменник-вымораживатель возвращаемый поток имеет температуру около −30 °C, что обеспечивает температурный напор порядка 15 °C относительно входящего газа (10 °C) и охлаждение его до −15 °C. Такое понижение температуры позволяет снизить влагосодержание природного газа более чем в два раза (при P = 4 МПа и T = 10 °C влагосодержание уменьшается с 82 до около 40 мг/кг), что в свою очередь сокращает объём сорбента и уменьшает потребность в тепле для его регенерации.

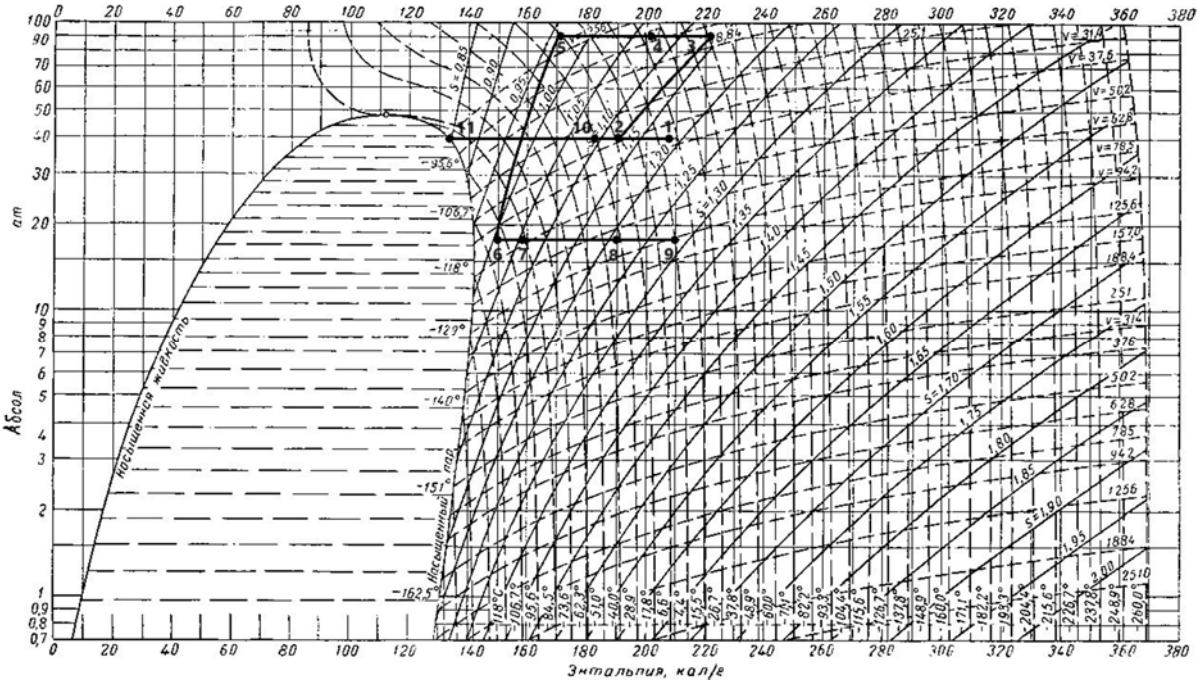


Рис. 3. Термодинамический цикл установки в h–logP диаграмме

Fig. 3. Thermodynamic cycle of the plant in h–logP diagram

Таблица 1

Параметры потоков газа по точкам цикла

Table 1

Gas flow parameters at cycle points

№ точки	Место протекания процесса	Давление, атм	Температура, °С	Краткое описание
1	Вход газа	40	10	Исходный природный газ
2	После охлаждения в ТО-вымораживателе	40	−15	Предварительное охлаждение
3	После компрессора	90	50	Сжатие
4	После внешнего охладителя	90	20	Охлаждение после сжатия
5	После предварительного ТО	90	−18	Охлаждение перед детандером
6	После детандера	18	−100	Получение низкопотенциального холода
7	После основного ТО	18	−87	Рекуперация холода
8	После предварительного ТО	18	−30	Окончание рекуперации
9	После ТО-вымораживателя	18	−4	Возврат на вход установки

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнительный анализ показал, что установка теплообменника-вымораживателя позволяет эффективно использовать внутренний холод цикла и повысить энтальпийную эффективность установки. Дополнительное теплообменное звено не приводит к существенным энергетическим потерям, поскольку функционирует в пределах существующего диапазона температуры и давления цикла Клода.

Таким образом, моделирование подтвердило, что установка с теплообменником-вымораживателем обеспечивает устойчивую работу цикла при существенном снижении энергозатрат на подготовку природного газа и повышении общей эффективности процесса частичного сжижения.

Моделирование показало, что использование теплообменника-вымораживателя в схеме установки частичного сжижения природного газа обеспечивает более эффективное использование внутреннего холода цикла и позволяет значительно снизить энергозатраты на осушку. Полученные результаты подтвердили возможность стабильной работы установки при заданных параметрах без необходимости применения внешних холодильных контуров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ и термодинамическое моделирование установки частичного сжижения природного газа показали, что установка теплообменника-вымораживателя в схему цикла Клода позволяет значительно повысить эффективность процесса подготовки газа за счёт более рационального использования внутреннего холода. Предварительное охлаждение потока до блока адсорбционной осушки обеспечивает частичное удаление влаги на стадии вымораживания, что снижает влагосодержание поступающего в установку газа более чем в два раза и сокращает тепловые затраты на регенерацию сорбента.

Результаты моделирования подтверждают, что предложенная схема сохраняет устойчивость термодинамического цикла при параметрах: давление на входе 40 атм,

температура 10 °С, давление после компрессора 90 атм и температура после детандерного расширения −100 °С. Полученный температурный профиль потоков (от −100 до −30 °С в зоне рекуперации) обеспечивает достаточный тепловой напор для эффективного охлаждения без необходимости применения внешних холодильных контуров.

Предложенная установка демонстрирует потенциал для дальнейшего совершенствования. Перспективными направлениями исследований являются:

– оптимизация степени расширения в детандере и давления в компрессорной ступени для повышения холодопроизводительности;

– уточнение характеристик цикла при работе с природным газом реального состава, содержащим этан, азот и углекислый газ;

– оптимизация компоновки теплообменников и внедрение автоматизированной системы регулирования потоков;

– оценка возможности интеграции установки в состав малотоннажных комплексов СПГ и проведения технико-экономического анализа эффективности модернизированной схемы.

Таким образом, разработанная установка обеспечивает энергетически эффективное решение задачи частичного сжижения природного газа и может служить основой для создания перспективных систем подготовки газа к транспортировке и хранению, особенно в условиях автономных или удалённых объектов газовой инфраструктуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент RU 187598 U1 Российская Федерация. Установка частичного сжижения природного газа. F25J 1/0022 (2018.08), МПК F25J 1/02 : № RU2017144255U : заявл. 18.12.2017 ; опубл. бюл. № 8 от 13.03.2019 / Краковский Б.Д., Паркин А.Н., Попов О.М., Сычков А.Е., Удут В.Н. ; правообладатель ОАО НПО Гелиймаш.
2. СТО Газпром 089.2010. Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам. Технические условия. Изд. официальное / утвержден и введен в действие распоряжением ОАО Газпром 25 октября 2010, № 359 ; взамен ОСТ 51.40-93. Москва : Газпром, 2010. 4 с.
3. Картель И.Ю., Губарев В.Я., Картель А.Ю. Анализ эффективности работы схемы сжижения природного газа при установке теплообменника-вымораживателя // Нано-био-технологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование :сборник статей международной научно-практической конференции. Липецк, 2024. С. 106-110.
4. Картель И.Ю., Губарев В.Я., Картель А.Ю. Модернизация схемы установки частичного сжижения природного газа с теплообменником-вымораживателем // Проблемы современной теплоэнергетики : сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию специальности «Промышленная теплоэнергетика» в ЛГТУ, 70-летию Липецкой области и 90-летию Новолипецкого металлургического комбината. Казань, 2024. С. 166-171.
5. Картель И.Ю., Картель А.Ю. Анализ эффективности работы схемы сжижения природного газа при установке теплообменника-вымораживателя // Тенденции развития современной науки : сборник трудов научно-практической конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета. Липецк, 2023. С. 1098-1102.
6. Анализ эффективности работы схемы сжижения природного газа при установке теплообменника-вымораживателя / Губарев В.Я., Картель А.Ю., Картель И.Ю., Шацких Н.А. // Нано-биотехнологии. Теплоэнергетика. Математическое моделирование : сборник статей международной научно-практической конференции. Липецк, 2023. С. 38-42.

7. Анализ эффективности различных схем ожижителей природного - газа / А.К. Грезин, Г.И. Бумагин, Ю.И. Ландаи [и др.] // Сборник научных трудов Сибирского регионального отделения МАХ. Криогенное оборудование и криогенные технологии. Вып. I. 4.I. Омск, 1997.
8. Мутовин Ю.Г. Покрытие пиковых неравномерностей газопотребления сжиженным природным газом и исследование технологических процессом его производства : специальность 05.15.13 "Нефтегазопроводы, базы и хранилища" : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. / Ю.Г. Мутовин ; ВНИИ природных газов. Москва : ВНИИГАЗ, 1988. 20 с.
9. Кириллов Н.Г. Сжиженный природный газ: области применения и технологии производства // Холодильный бизнес. 2002.
10. Саркисян В.А. Экономические проблемы газификации и использования СПГ // АвтоГазоЗаправочный Комплекс. 2002.
11. Патент RU 2212598 C1 Российская Федерация. Способ частичного сжижения природного газа и устройство для его осуществления. МПК F25J 1/00 : опубл. 20.09.2003 / Горбачев С.П.
12. Патент RU 2272971 C2 Российская Федерация. Установка частичного сжижения природного газа. МПК F25J 1/00 : № 2004112285/06 : заявл. 23.04.2004 : опубл. Бюл. № 9 27.03.2006 / Краковский Б.Д., Мартынов В.А., Попов О.М., Русинов Д.А., Удут В.Н. ; заявитель НПО Гелиймаш.
13. Патент RU 2538192 C1 Российская Федерация. Способ сжижения природного газа и установка для его осуществления. МПК F25J 1/00 : № 20131490/06 : заявл. 07.11.2013 : опубл. Бюл. № 1 10.01.2015 / Мамаев А.В., Сиротин С.А., Копша Д.П., Бахметьев А.П., Ишмурзин А.В., Лебедев Ю.В., Новиков Д.В., Афанасьев И.П., Ходаковский В.А. ; правообладатель: ОАО Газпром.
14. Патент RU 2645095 C1 Российская Федерация. Способ частичного сжижения природного газа (варианты). СПК F25J 1/0022 (2006.01), F25J 1/0035 (2006.01), F25J 3/0214 (2006.01) : № 2017111174 : заявл. 03.04.2017 : опубл. Бюл. № 5 20.08.2014 / Горбачев С.П., Медведков И.С. ; патентообладатель НИИ ВНИИГаз.
15. Патент RU 2753206 C1 Российская Федерация. Способ автономного производства сжиженного природного газа. СПК F25J 1/0022 (2021.05) : № 2021101588 : заявл. 26.01.2021 : опубл. Бюл. № 23 12.08.2021 / Белоусов Ю.В. ; патентообладатель Белоусов Ю.В.
16. Горбачев С.П., Медведков И.С. Частичное сжижение природного газа в малотоннажных установках с блоком низкотемпературной очистки //Транспорт на альтернативном топливе 2013. № 2 (32). С. 48-51.
17. Barron R.F. Cryogenic Systems. 2nd ed. Oxford : Oxford University Press, 1985.
18. Venkatarathnam V. Cryogenic Mixed Refrigerant Processes. Cham : Springer, 2008.
19. Kidnay A.J., Parrish W.R., McCartney D.G. Fundamentals of Natural Gas Processing. 3rd ed. Boka Raton (USA) : CRC Press, 2019.
20. Comprehensive review of current natural gas liquefaction processes / J. Zhang , H. Meerman, R. Benders, A. Faaij. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.114736 // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 174. P. 115292.

REFERENCES

1. Patent RU 187598 U1 Russian Federation. Partial liquefaction unit for natural gas. IPC F25J 1/0022 (2018.08), F25J 1/02 : № RU2017144255U : declared 18.12.2017 ; published the bulletin № 8 13.03.2019 / Krakovsky B.D., Parkin A.N., Popov O.M., Sychkov A.E., Udut V.N. ; copyright holder : NPO Geliymash JSC.

2. STO Gazprom 089.2010. Flammable natural gas supplied and transported via main gas pipelines. Technical conditions. Official edition / approved and put into effect by order of OAO Gazprom dated October 25, 2010, No. 359; replacing OST 51.40-93. Moscow: Gazprom, 2010. 4 p.
3. 3 Kartel I.Yu., Gubarev V.Ya., Kartel A.Yu. Efficiency Analysis of a Natural Gas Liquefaction System with a Freezing Heat Exchanger // Nano-biotechnologies. Thermal Power Engineering. Mathematical Modeling. Collection of papers from the international scientific and practical conference. Lipetsk, 2024. P. 106-110.
4. KartelI.Yu., GubarevV.Ya., KartelA.Yu. Modernization of a Partial Natural Gas Liquefaction System with a Freezing Heat Exchanger // Problems of Modern Thermal Power Engineering. Collection of papers from the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 50th anniversary of the Industrial Thermal Power Engineering specialty at LGTU, the 70th anniversary of the Lipetsk Region, and the 90th anniversary of the Novolipetsk Iron and Steel Works. Kazan, 2024. P. 166-171.
5. Kartel I.Yu., Kartel A.Yu. Analysis of the efficiency of the natural gas liquefaction circuit with the installation of a heat exchanger-freezer // Trends in the development of modern science. Collection of papers of the scientific and practical conference of students and postgraduates of Lipetsk State Technical University. Lipetsk, 2023. P. 1098-1102.
6. Analysis of the efficiency of the natural gas liquefaction circuit with the installation of a heat exchanger-freezer / V.Ya. Gubarev, A.Yu. Kartel, I.Yu. Kartel, N.A. Shatskikh // Nano-bio-technologies. Heat power engineering. Mathematical modeling. Collection of articles of the international scientific and practical conference. Lipetsk, 2023. P. 38-42.
7. Analysis of the efficiency of various natural gas liquefiers / A.K. Grezin, G.I. Bumagin, Yu.I. Landai [et al.] // Coll. studies, tr. Siberian regional department of MAH. Cryogenic equipment and cryogenic technologies. Issue I. 4.I. - Omsk, 1997.
8. MutovinYu.G. Covering peak unevennesses of gas consumption by liquefied natural gas and study of technological processes of such and large numbers of people: Aistorsf. leaflet of candidate of technical sciences. Moscow : VNIIGAZ, 1988. 20 p.
9. Kirillov N.G. Liquefied natural gas: areas of application and production technologies // Refrigeration business. 2002.
10. Sargsyan V.A. Economic problems of gasification and use of LNG // AvtoGaz-Zapravochny Complex. 2002.
11. Patent RU 2212598 C1 Russian Federation. Method for partial liquefaction of natural gas and device for its implementation МПК F25J 1/00 : published 20.09.2003 / Gorbachev S.P
12. Patent RU 2272971 C2 Russian Federation. Installation for partial liquefaction of natural gas. МПК F25J 1/00 : № 2004112285/06 : declared 23.04.2004 : published the bulletin № 9 27.03.2006 / Krakovsky B.D., Martynov V.A., Popov O.M., Rusinov D.A., Udut V.N.
13. Patent RU 2538192 C1 Russian Federation. Method for liquefaction of natural gas and device for its implementation. МПК F25J 1/00 : № 20131490/06 : declared. 07.11.2013 : published the bulletin № 1 10.01.2015 /Mamaev A.V., Sirotin S.A., Kopsha D.P., Bakhmetyev A.P., Ishmurzin A.V., LebedevYu.V., Novikov D.V., Afanasyev I.P., Khodakovsky V.A.; copyright holder: OAO Gazprom.
14. Patent RU 2645095 C1 Russian Federation. Method for partial liquefaction of natural gas (variants). СПК F25J 1/0022 (2006.01), F25J 1/0035 (2006.01), F25J 3/0214 (2006.01) : № 2017111174 : declared 03.04.2017 : published the bulletin № 5 20.08.2014 / Gorbachev S.P., Medvedkov I.S.
15. Patent RU 2753206 C1 Russian Federation. Method for autonomous production of liquefied natural gas. СПК F25J 1/0022 (2021.05) : № 2021101588 : declared

26.01.2021 : published the bulletin № 23 12.08.2021 / BelousovYu.V.
16. Gorbachev S.P., Medvedkov I.S. Partial liquefaction of natural gas in small-tonnage units with a low-temperature cleaning unit // Alternative Fuel Transport 2013. No. 2 (32). P. 48-51.
17. Barron R.F. Cryogenic Systems. 2nd ed. Oxford : Oxford University Press, 1985.
18. Venkatarathnam V. Cryogenic Mixed Refrigerant Processes. Cham : Springer, 2008.
19. Kidnay A.J., Parrish W.R., McCartney D.G. Fundamentals of Natural Gas Processing. 3rd ed. Boka Raton (USA) : CRC Press, 2019.
20. Comprehensive review of current natural gas liquefaction processes / J. Zhang , H. Meerman, R. Benders, A. Faaij. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2019.114736 // Applied Thermal Engineering. 2020. Vol. 174. P. 115292.